УДК 004.89:621.396.96

И.Ю. Гришин
Крымский государственный гуманитарный университет, г. Ялта, Украина
igrishin@ukr.net

Метод адаптивного управления параметрами режима сопровождения многофункционального радиолокационного комплекса

В статье рассматривается метод адаптивного управления параметрами режима сопровождения радиолокационного комплекса (РЛК). Полученные решения определяют закон адаптивного управления частотой повторения и длительностью тактов измерения положения сопровождаемых целей, что позволяет выбирать переменный темп локации в зависимости от характеристик целей и их положения в зоне обзора РЛК.

Введение

Радиолокационная система обладает ограниченными возможностями по получению и преобразованию информации о потоках объектов (целей). Существенным резервом повышения эффективности работы многофункционального радиолокационного комплекса (МФ РЛК) является оптимизация управления ее параметрами при реализации каждого функционального режима [1]. Применительно к режиму сопровождения целью управления обычно служит повышение точности оценки координат сопровождаемых объектов, а также снижение временных и энергетических затрат, что, в свою очередь, приводит к повышению пропускной способности РЛК. В ряде работ [2-5] рассмотрены основные подходы к организации сопровождения объектов, которые учитывают нестационарность модели движения объектов или статистических характеристик канала измерения координат, однако комплексного решения проблемы предложено не было.

Целью данной работы является разработка метода адаптивного управления темпом локации сопровождаемых объектов в зависимости от степени неопределенности в знании динамики движения, уровня шумов в канале измерения, а также временного ресурса, выделенного на сопровождение.

Постановка задачи

В качестве параметров режима сопровождения примем длительность такта измерения положения i -й сопровождаемой цели τ_i и частоту повторения этих тактов F .

Распределение времени работы МФ РЛК при сопровождении N целей с одновременной реализацией одного или нескольких других функциональных режимов представим в виде:

$$\sum_{i=1}^{N} E_i = E_c , \tag{1}$$

где E_i – ресурс времени (т.е. часть времени в течение интервала $[0,T]$), выделяемый на измерение координат i-й сопровождаемой цели;

E_c – ресурс времени РЛС, выделяемый на реализацию функционального режима сопровождения.

Ресурс времени E_i состоит из тактов измерения положения i-й сопровождаемой цели длительностью τ_i, которые повторяются с частотой F_i:

$$E_i = \tau_i F_i \,. \tag{2}$$

Будем полагать, что процесс изменения измеряемой координаты сопровождаемой цели описывается линейным стохастическим дифференциальным уравнением вида:

$$\dot{x}(t) = ax(t) + \omega(t)\,, \tag{3}$$

где $x(t)$ – измеряемая координата;

$\omega(t)$ – белый центрированный гауссовский шум с дисперсией σ_0^2.

При реализации процесса сопровождения проводятся измерения фазовой координаты x, уравнение измерений представимо в виде :

$$z(t) = x(t) + v(t)\,, \tag{4}$$

где $v(t)$ – белый центрированный гауссовский шум с дисперсией σ_v^2.

Условимся, что основные временные соотношения исследуемого процесса таковы, что интервал времени длительностью τ_T является тактом измерения, а величина $T_\bullet$ определяется через частоту повторения тактов измерения как $T_\bullet = 1/F$.

В результате измерения в конце такта образуется дискретное измерение фазовой переменной, которое запишем в виде:

$$z_n = x_n + \Delta\, z_n\,, \tag{5}$$

где n – номер такта измерения;

$\Delta\, z_n$ – белый центрированный гауссовский шум с дисперсией $\sigma_z^2 = \sigma_v^2 / \Delta\tau$, $\Delta\tau = \tau_T - \tau_0$, а величина τ_0 является непроизводительными (с точки зрения процесса определения параметров положения сопровождаемого объекта) потерями в такте измерения.

Традиционным способом управления РЛК в режиме сопровождения является априорный расчет τ_i и F_i (а следовательно, и E_i), удовлетворяющих принятым критериям качества управления, и сопровождение объекта в зоне ответственности РЛК с выбранными постоянными значениями τ_i и F_i. Такой способ функционирования неэффективен, так как оптимальное соотношение между длительностью тактов τ_i и частотой их повторения F_i при фиксированном значении E_i зависит от соотношения между уровнем шумов в канале измерений и динамическими характеристиками цели (уровнем шумов в модели объекта), которые могут существенно меняться по мере движения объекта в зоне обзора РЛК. Действительно, при больших шумах в канале измерений ошибки сопровождения можно уменьшить, увеличивая длительность излучаемых сигналов (или, что то же самое, увеличивая длительность такта измерения). С другой стороны, при больших шумах в модели сопровождаемой цели уменьшение ошибки сопровождения может быть достигнуто за счет проведения более частых измерений [1] (т.е. путем повышения частоты повторения тактов за счет уменьшения их длительности). Кроме того, выбор постоянных значений τ_i и F_i означает применение постоянного темпа локации сопровождаемых объектов, что в ряде случаев не обеспечивает полного использования информационных возможностей РЛК.

Таким образом, задача состоит в выборе оптимальных значений длительности такта измерения τ_T и частоты повторения F, связанных между собой условием (2) (здесь и далее индексы «i» для сокращения записи опущены). Критерием качества управления будем считать величину экстраполированной ошибки оценки положения сопровождаемой цели.

Разработка метода управления

Уравнение динамики системы (3) и уравнение дискретных измерений (5) соответствуют условиям проведения оптимальной линейной фильтрации случайных процессов [6]. Следовательно, связь между дисперсиями ошибок априорной и апостериорной оценок в n-м такте измерения определяется как:

$$\Sigma_n^+ = \left(1 - K_n\right)\Sigma_n^-, \tag{6}$$

где Σ_n^+ – дисперсия ошибки апостериорной оценки фазовой координаты;

Σ_n^- – дисперсия ошибки априорной оценки;

K_n – коэффициент усиления фильтра, причем

$$K_n = \Sigma_n^-\left[\Sigma_n^- + \sigma_z^2\right]^{-1}. \tag{7}$$

Подставив (7) в (6), получим зависимость апостериорной ошибки от ее априорного значения и дисперсии шума дискретных измерений:

$$\Sigma_n^+ = \left(\Sigma_n^-\sigma_z^2\right) \Big/ \left(\Sigma_n^- + \sigma_z^2\right). \tag{8}$$

Выбор оптимального темпа локации сводится к выбору момента проведения следующего измерения. Примем за время экстраполяции интервал между измерениями $T_\bullet$. Тогда дисперсия экстраполированной оценки будет равна дисперсии априорной ошибки оценки перед проведением $(n+1)$-го измерения Σ_{n+1}^-, которая, в свою очередь, для системы (3), (5) рассчитывается как [7]:

$$\Sigma_{n+1}^- = \Sigma_n^+ \exp\left(2aT_\bullet\right) + \left(\sigma_0^2 / 2a\right)\left[\exp\left(2aT_\bullet\right) - 1\right]. \tag{9}$$

В качестве дополнительного условия используем требование устойчивости сопровождения объектов (стационарности режима сопровождения), т.е. требование равенства величины дисперсии априорных ошибок перед каждым измерением:

$$\Sigma_n^- = \Sigma_{n+1}^- = \Sigma_э. \tag{10}$$

С учетом (8) и (9) может быть найдено решение уравнения (10) относительно $\Sigma_э$ и записано выражение для критерия качества сопровождения в виде

$$\begin{aligned} \Sigma_э = 0{,}5[\ &[\exp\left(2a/F\right) - 1]\ [\sigma_z^2 + \sigma_0^2/2a] + \\ &+ [\ [\exp\left(2\mathrm{a}/\mathrm{F}\right) - 1]^2 [\sigma_z^2 + \sigma_0^2/2a]^2 + \\ &+ \left(2\sigma_z^2\sigma_0^2/a\right)\ [\exp\left(2\mathrm{a}/\mathrm{F}\right) - 1]\ ]^{1/2}]. \end{aligned} \tag{11}$$

Выражение (11) можно существенно упростить в предположении, что интервал между измерениями $T_\bullet$ много меньше постоянной времени системы a, т.е $F \rangle\rangle a$. При этом, используя представление экспоненциальной функции степенным рядом, получим:

$$\Sigma_э = \left(2\sigma_z^2 a + \sigma_0^2\right) \Big/ 2F + \left[\left(2\sigma_z^2 a + \sigma_0^2\right)^2 \Big/ 4F^2 + \sigma_z^2\sigma_0^2 / F\right]^{1/2} \tag{12}$$

или

$$\Sigma_э = \frac{2\sigma_v^2 a\tau + \sigma_0^2(\tau - \tau_0)\tau}{2E(\tau - \tau_0)} + \left[\frac{\left(2\sigma_v^2 a\tau + \sigma_0^2(\tau - \tau_0)\tau\right)^2}{4E(\tau - \tau_0)^2} + \frac{\sigma_v^2\sigma_0^2\tau}{E(\tau - \tau_0)}\right] \qquad (13)$$

Зависимость дисперсии априорных ошибок перед измерениями от величины длительности зондирующего сигнала τ_T приведена на рис. 1.

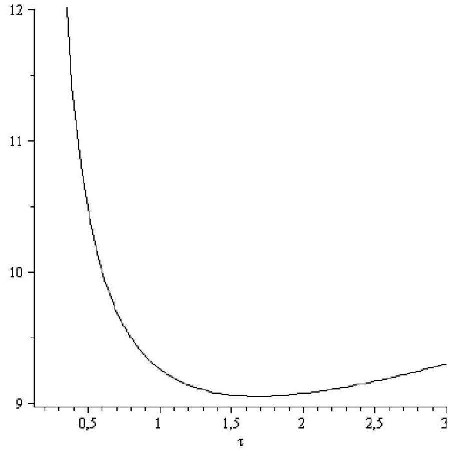


Рисунок 1 – Зависимость дисперсии априорных ошибок перед измерениями от величины длительности зондирующего сигнала ($E = 20;\ \tau_0 = 0{,}1;\ \sigma_\nu = 5;\ \sigma_0 = 2;\ a = 1$)

Из анализа рис. 1 может быть сделан вывод о наличии оптимальной длительности зондирующего сигнала. Для поиска значения оптимальной величины τ_T, доставляющей min критерию (13), продифференцируем это выражение по τ_T. В результате получим следующее выражение:

$$\frac{d\Sigma_э}{d\tau} = -\frac{1}{2E(\tau - \tau_0)^3}\Big(-\sigma_0^4\tau^4 + \left(3\sigma_0^4\tau_0 - 2a\sigma_\nu^2\sigma_0^2 - \sigma_0^2\right)\tau^3 + 3\left(\sigma_0^2\tau_0 - \sigma_0^4\tau_0^2 + 2a\sigma_\nu^2\sigma_0^2\tau_0\right)\tau^2 +$$
$$+\left(-3\sigma_0^2\tau_0^2 + 2a\sigma_\nu^2\tau_0 + 2\sigma_\nu^2\sigma_0^2\tau_0 - 4a\sigma_\nu^2\sigma_0^2\tau_0^2 + \sigma_0^4\tau_0^3 + 4a^2\sigma_\nu^4\tau_0\right)\tau - 2a\sigma_\nu^2\tau_0^2 - 2\sigma_\nu^2\sigma_0^2\tau_0^2 + \sigma_0^2\tau_0^3\Big). \qquad (14)$$

Графически зависимость (14) представлена на рис. 2. Из анализа видно, что физически реализуемым значениям τ_T ($\tau_T \ge \tau_0$) соответствует только одно нулевое значение производной.

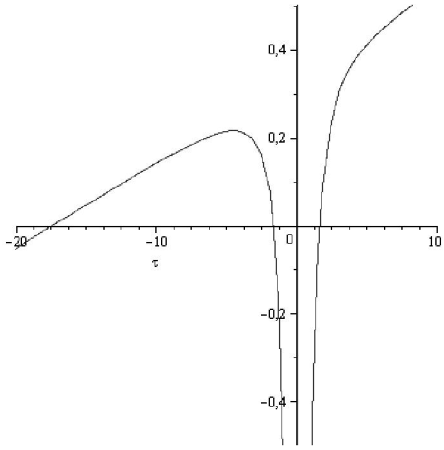


Рисунок 2 – Зависимость производной $\frac{d\Sigma_э}{d\tau}$ от величины длительности зондирующего сигнала ($E = 20;\ \tau_0 = 0{,}1;\ \sigma_\nu = 5;\ \sigma_0 = 2;\ a = 1$)

Приравняв значение производной к нулю и решив полученное уравнение $\frac{d\Sigma_э}{d\tau} = 0$ при заданных значениях дисперсий шумов в модели динамики сопровождаемой цели σ_0^2 и канале измерений σ_v^2, выделенного на сопровождение конкретной цели временного ресурса E и величины непроизводительных потерь времени τ_0 в такте измерения, можно получить значение оптимальной длительности такта измерения τ_T и через уравнение (2) – оптимальную частоту повторения измерений F. Например, при рассматриваемых ранее значениях указанных параметров τ^{opt} =1,68 с.

Выводы

В результате проделанной работы получено решение задачи оптимизации параметров режима сопровождения радиолокационного комплекса, которое сводится к выбору оптимальных моментов проведения измерений и оптимальной длительности каждого измерения, т.е. к выбору оптимального (в общем случае переменного) темпа локации. Отличие полученных результатов от ранее известных заключается в том, что предложенный подход определяет (с учетом принятой терминологии) адаптивное управление темпом локации (частотой повторения и длительностью тактов измерения положения сопровождаемой цели) в зависимости от степени неопределенности в знании динамики цели и уровня шумов в канале измерений, а также временного ресурса, выделенного на сопровождение цели.

Литература

1. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации / Кузьмин С.З. – М. : Радио и связь, 1986. – 352 с.
2. Конторов Д.С. Введение в радиолокационную системотехнику / Д.С. Конторов, Ю.С. Голубев-Новожилов. – М. : Сов. радио, 1971. – 368 с.
3. Гришин И.Ю. Проблемы управления зенитными ракетными комплексами / И.Ю. Гришин, М.К. Можар, В.М. Решетник // Наука і оборона. – 1994. – Вип. 3. – С. 27-32.
4. Гришин И.Ю. Оптимизация управления многопозиционным радиолокационным комплексом / И.Ю. Гришин, М.К. Можар, В.И. Есин // Тезисы докладов 2-й Всесоюзной научно-технической конференции. – Туапсе, 1991. – С. 48-49.
5. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / Кузьмин С.З. – Киев : КВЦ, 2000. – 428 с.
6. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах / [под ред. К.Т. Леондеса]. – М. : Мир, 1980. – 407 с.
7. Медич Дж. Статистически оптимальные линейные оценки и управление / Медич Дж. – М. : Энергия, 1973. – 440 с.

І.Ю. Грішин

Метод адаптивного управління параметрами режиму супроводження багатофункціонального радіолокаційного комплексу

У статті розглядається метод адаптивного управління параметрами режиму супроводження радіолокаційного комплексу (РЛК). Отримані рішення визначають закон адаптивного управління частотою повторення і тривалістю тактів вимірювання положення супроводжуваних цілей, що дозволяє вибирати змінний темп локації залежно від характеристик цілей і їх положення в зоні огляду РЛК.

I.Yu. Grishin

Adaptive Control Method by Parametres of the Multifunctional Radar Support Mode

In the paper the method of adaptive control by parametres of the multifunctional radar complex support mode is considered. The received solutions define the law of adaptive control by repetition frequency and duration of position measurement clock ticks of the observable objects that allows to select variable location rate, which depends on characteristics of the purposes and their position in allowed band of radar browse.

Статья поступила в редакцию 12.05.2009.